

# 非線形触覚素子による大面積人工皮膚

○星 貴之, 篠田 裕之 (東京大学)

## Large-Area Artificial Skin Based on Non-Linear Tactile Element

○Takayuki HOSHI and Hiroyuki SHINODA (The University of Tokyo)

**Abstract:** In this paper, we propose a tactile sensor skin based on a new concept. Each tactile element acquires a contact area in addition to a contact force within its several-cm-sq. large sensing area. These two parameters provide us with rich tactile information when the elements are arrayed in low density. We also propose a new linking method without long wires.

### 1. はじめに

近年、我々の日常生活の中で活動するロボットの研究が盛んに行われている。それらが周囲の環境を把握し、人間と安全に触れ合うため、全身を覆う触覚センサ(人工皮膚)への期待が高まっている<sup>1)</sup>。人工皮膚には(1)豊富な触覚情報を得ることに加えて、(2)大面積を覆うこと、(3)柔軟であることが求められる<sup>2)</sup>。これまでに試みられてきた多くの人工皮膚は、力センサ素子のアレイであった。そのような人工皮膚の性能を向上するひとつの方法は、センサ素子を高密度に配列することである。しかし1 mm 以下の間隔にしようとすると配線が煩雑になり、現状では実現が困難である。

その問題を解決するため、我々は新しい触覚素子を開発した<sup>3)</sup>。それは数 cm 角という比較的大きなセンシングエリアを持ち、その中で圧力分布の総和(力)だけでなく圧力分布の面積をも取得する。材料の非線形弾性を用いて計測するため、これを非線形触覚素子と呼ぶ。2つのパラメータを計測することにより、低いアレイ密度でも豊富な触覚情報が得られる。これは人間の触覚特性にヒントを得た考え方である。人間の二点弁別閾は全身の多くの部位(手、顔以外)において数 cm と大きな値を持つ<sup>4)</sup>。しかしそのような分解能の粗い部位においても、対象物体の鋭さに関しては非常に感度よく識別することができる。これらの事実から、“鋭さ”という特徴が人間の触感について重要な役割を担っていると考えられる<sup>5)</sup>。そして、同様の特性を持つ人工皮膚は人間の皮膚に大きく近づけるのではないかと期待している。

また過去に提案したセルブリッジシステム<sup>6)</sup>を応用し、煩雑な配線が不要なセンサアレイを実現することができる。それは触覚素子の境界に計測/通信チップ(ブリッジ)を配置する方法である。ブリッジは触覚素子の出力を計測し、さらに触覚素子を通信路(セル)としても利用してホストコンピュータまで伝送する。配線はブリッジ周辺の局所的なものであり、センサアレイの物理的な柔軟性を保つことができる。

### 2. 人工皮膚の構造

Fig. 1 に、提案する人工皮膚の模式図を示す。硬さの異なる絶縁層(発泡ウレタンシート)が2層あり、それらが3枚の

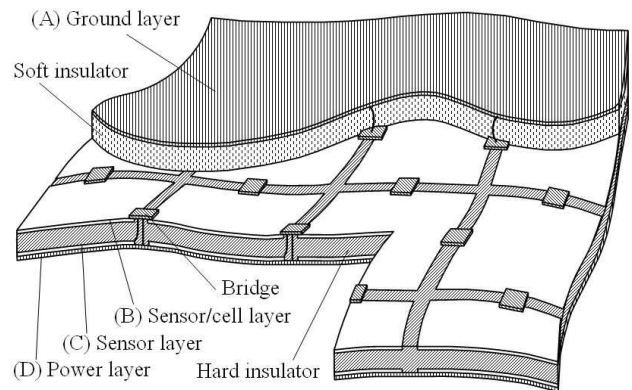


Fig. 1 Illustration of proposed robot skin.

導電層(表面から順に (A)グラウンド層、(B)センサ/セル層、(C)センサ層)に挟まれている。導電層の間にはコンデンサが形成される。柔らかい絶縁層を挟むコンデンサを  $C_1$ 、硬い絶縁層を挟むコンデンサを  $C_2$  と呼ぶ。このふたつのコンデンサがひとつの触覚素子を構成する。センサ/セル層及びセンサ層の領域がひとつの触覚素子のセンシングエリアにあたる。またその下には、センサ層と絶縁されて(D)電源層が置かれる。グラウンド層と電源層は静電シールドとしても働く。センサ/セル層の境界にはブリッジが配置される。ブリッジはグラウンド層と電源層から電力の供給を受け、 $C_n$  [F] ( $n = 1, 2$ ) を計測し、センサ/セル層を介してマルチホップすることによりホストコンピュータまでデータを伝送する。

#### 2.1 非線形触覚素子<sup>3)</sup>

一般に柔軟な材料は圧力に対して非線形な弾性を示す。ここで、絶縁層の非線形弾性が式(1)のようなエントロピー弾性<sup>7)</sup>で表されると仮定する。

$$\sigma = \frac{E_n}{3} \left( \frac{1}{\lambda_n} - \lambda_n^2 \right) \quad (n=1, 2) \quad (1)$$

$\lambda_n \equiv 1 - d_n / (\Delta d_n - d_{n0})$  は伸長比である。 $n$  は絶縁層を区別する添え字であり、 $n = 1$  が上側の柔らかい層を、 $n = 2$  が下側の硬い層を表す。 $\sigma$  [Pa]、 $E_n$  [Pa]、 $d_n$  [m]、 $\Delta d_n$  [m]、 $d_{n0}$  [m] はそれぞれ表面に垂直な圧力、絶縁層のヤング率、初期厚み、および限界まで圧縮されたときの最終的な厚み

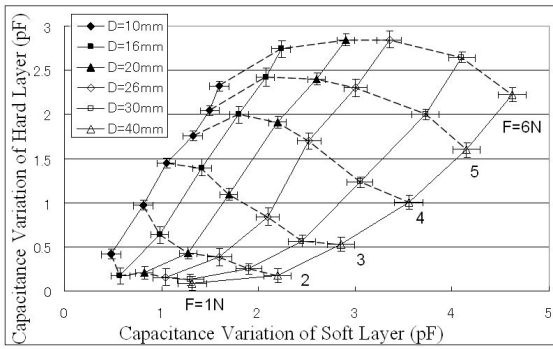


Fig. 2 Experimental results of 5 trials. Averaged trajectories of  $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ s for various  $(F, S)$ s with error bars representing maximal deviations.<sup>3)</sup>  $D \equiv 2\sqrt{S/\pi}$ .

である。さらに、導電層に生じる張力と絶縁層のポアソン比が無視できるほど小さいと仮定する。これにより垂直方向の表面応力による水平方向への影響が無視できることになる。そのとき、変位分布  $\Delta d_n(x, y)$  は直上の圧力分布  $\sigma(x, y)$  によってのみ決定される。導電層(全体)間の静電容量  $C_n$  は漏れ電界を無視すると式(2)のように表される。

$$C_n = \iint_{\text{Element}} \frac{\epsilon_n}{d_n - \Delta d_n(x, y)} dx dy \quad (n=1, 2) \quad (2)$$

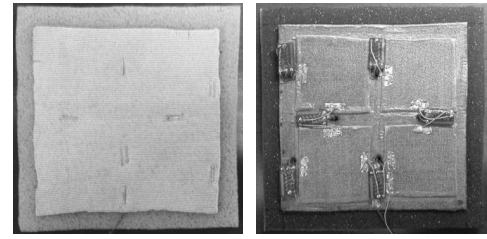
$\epsilon_n$  [F/m] は絶縁層の誘電率である。接触面内での圧力分布が  $\sigma = F/S$  ( $F$  [N],  $S$  [m<sup>2</sup>] は力と面積) であるとき、前述の仮定により  $(C_1, C_2)$  は  $(F, S)$  によって一意に定まる。そして、逆に  $(C_1, C_2)$  から  $(F, S)$  が推定できることを、これまでに試作触覚素子によって示している(Fig. 2)。

## 2.2 計測／通信チップ (ブリッジ)

0.35 $\mu$ m CMOS プロセスによるアナログ／デジタル混載 LSI を試作し、ブリッジを作成した。チップサイズは 5 $\times$ 5 mm<sup>2</sup>、そのうち実際のアナログ／デジタル回路の面積は 1.5 mm<sup>2</sup> 以下である。動作周波数は 50 MHz、 $C_n$  を計測するため 8-bit A/D コンバータを搭載している。その変換データとそれぞれのブリッジ固有の ID を含んだパケットを隣のブリッジに送信する。今回はフロー制御を行わず、1 ms ごとにパケットを送信する仕様となっている。この LSI チップをフレキシブル基板によってパッケージングした(9 $\times$ 16 $\times$ 2 mm<sup>3</sup>)。

## 3. 試作・実験

前述の触覚素子とブリッジにより 2 $\times$ 2 のアレイを試作した(Fig. 3)。ひとつの素子のサイズは 40 $\times$ 40 $\times$ 9 mm<sup>3</sup>とした。現在の試作 LSI にはまだセンサ／セル層を通信に用いるプロトコルを実装していないため、外部にセル層を追加している。この試作人工皮膚を用いて、ブリッジが各触覚素子の静電容量を計測し、その計測データが最大2回のホップを経て PC へ正常に送られてくることを確認した。Fig. 4 に、計測データから接触力  $F$  (円柱の高さ)と接触面積  $S$  (円柱の底面積)を推定している様子を示す。



(a) Top

(b) Bottom

Fig. 3 Developed 2 $\times$ 2 tactile sensor array. Each sensor element is 40 $\times$ 40 $\times$ 9 mm<sup>3</sup>.

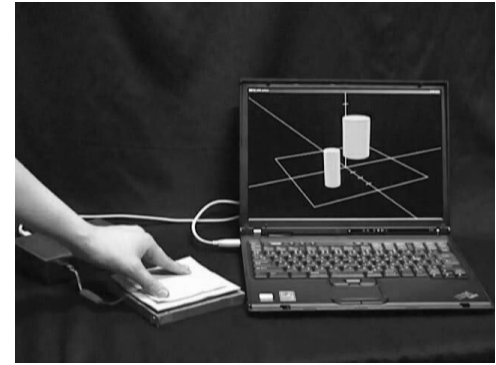


Fig. 4 Demonstration. One element (near side) is pressed by the thumb, and the other (far side) is pressed by the first and second fingers.

## 4. おわりに

前述したように今回用いたブリッジにセンサ／セル層を通信に用いるプロトコルが実装されていなかったため、追加のセル層が必要であった。現在、次のバージョンとしてセンサ／セル層を通信に用いる LSI の試作が終わり、その動作確認実験を行っている段階である。通信する際には導電層を、抵抗を介して電源電圧にプルアップする。一方、静電容量計測では導電層をフロートにする必要がある。新しい LSI にはそれら2つのモードを切り替えるためのスイッチング回路が搭載されており、計測と通信を時分割で行う。

## 参考文献

- 1) M. H. Lee and H. R. Nicholls: Tactile sensing for mechatronics - A state of the art survey, *Mechatronics*, **9**, 1/31 (1999)
- 2) 篠田裕之: 接触センシングの現状と今後の展開, *日本ロボット学会誌*, **20-4**, 385/388 (2002)
- 3) 星貴之, 篠田裕之: 接触力と接触面積を計測する非線形触覚素子, *計測自動制御学会論文集*, **42-7**, 727/735 (2006)
- 4) 大山正, 今井省吾, 和気典二(編): 新編感覚・知覚ハンドブック, 1232, 誠信書房 (1994)
- 5) Y. Makino, N. Asamura and H. Shinoda: Multi primitive tactile display based on suction pressure control, *Proc. Haptic Symposium 2004*, 90/96 (2004)
- 6) A. Okada, Y. Makino and H. Shinoda: Cell bridge: A signal transmission element for constructing high density sensor networks, *Proc. INSS 2005*, 180/185 (2005)
- 7) G. R. Strobl: *The Physics of Polymers: Concepts for Understanding Their Structures and Behavior*, Chap. 7, Springer (1997)